

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 21720061152097

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

红树林地区常见鱼类对重金属的生物放大作用的研究

**Biomagnification of Heavy Metals in Common Fish
from Mangrove Areas of China**

虎 贞 贞

指导老师姓名: 丁振华 教授

专 业 名 称: 植 物 学

论文提交时间: 2009 年 6 月

论文答辩时间: 2009 年 7 月

学位授予时间: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

()1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

()2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年 月

目录

摘要	1
Abstract	3
第一章 前言	5
1 重金属的危害	5
2 稳定同位素方法的优越性和可行性	6
3 稳定同位素方法在生态学中的应用	8
3.1 研究生态系统中的碳源和生物的食性	8
3.2 研究生物的营养级, 构建食物网(链)	10
3.3 研究污染物的生物放大作用	10
4 本论文研究的目的、意义和主要内容	11
5 本文的创新点	12
第二章 材料与方法	13
1 样地概况	13
2 样品的采集及处理	13
3 主要试剂和仪器	15
4 样品分析	15
4.1 碳、氮同位素分析	15
4.2 重金属元素的测定	15
4.3 甲基汞的测定	15
5 统计分析方法	16
第三章 生物样品消解方法的比较选择	17
1 四种消解方法的具体操作过程	17
2 测定结果	17
3 四种消解方法的比较	19
3.1 操作过程的比较	19
3.2 测定结果的比较	19
第四章 结果与讨论	21
1 红树林生态系统鱼类重金属的含量特征	21
2 不同地区同种鱼类重金属含量的比较	24
3 鱼类生活习性对重金属含量的影响	26
4 鱼类重金属含量之间及其与体长、体重的相关性	31
5 不同生物重金属含量的比较——以浮宫为例	36
6 浮宫鱼类重金属含量的季节变化	37

7 生物质量评价	39
7.1 评价方法和标准	39
7.2 评价结果	40
8 红树林生态系统中鱼类的同位素特征（同位素食物网结构）	42
9 重金属含量与稳定同位素比值的关系	43
第五章 结论	47
参考文献	49
致谢	56

Content

Abstract (in Chinese)	1
Abstract (in English)	3
Chapter1: Preface	5
1 Harm of heavy metals	5
2 Advantage and feasibility of stable isotope method	6
3 Application of stable isotope method in ecology.....	8
3.1 Study on carbon source of ecosystem and animals' diet habit.....	8
3.2 Study on animals' trophic position to construct food web (chain).....	10
3.3 Study on biomagnification of pollutants.....	10
4 Purpose and main content of present study.....	11
5 Innovation of this thesis.....	12
Chapter2: Materials and Methods	13
1 Study areas	13
2 Sampling and preparation.....	13
3 Main reagents and instruments.....	15
4 Analysis of samples	15
4.1 Analysis of stable isotope C and N.....	15
4.2 Analysis of 7 heavy metals.....	15
4.3 Analysis of MeHg	15
5 Data processing	16
Chapter3: Comparison of four digestive methods	17
1 Process of four digestive methods	17
2 Results of mensuration	17
3 Comparison of four digestive methods	19
3.1 Comparison of process	19
3.2 Comparison of mensuration results	19
Chapter4: Results and Discussion	21
1 Enrichment ability and heavy metal content of different species of fish in the same region	21
2 Influence of living habits on heavy metal content in fish.....	24
3 Correlation among heavy metal content , length and weight	26

4 Comparison of heavy metal content in the same species of fish in different regions	31
5 Comparison of heavy metal content of different organisms in Fugong	36
6 Seasonal variation of heavy metal content of fish in Fugong	37
7 Evaluation of biological quality	39
7.1 Method and standard of evaluation	39
7.2 Result of evaluation	40
8 Stable isotope characters of fish in mangrove ecosystem	42
9 Correlation between heavy metal content and stable isotope ratios in fish	43
Chapter5: Conclusions	47
Reference	49

摘要

随着科技的飞速进步和社会的迅猛发展, 重金属污染给环境造成了严重危害, 日益引起人们的广泛关注, 成为了环境科学、生物学的热点研究问题之一。在国内本文首次将稳定性同位素技术与污染生态学相结合应用于红树林生态系统, 在比较选择样品消解方法的基础上, 研究了 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As、Hg 和 MeHg 等重金属污染物在 3 个红树林区主要经济动物——鱼虾体内的含量特征, 以及它们通过食物链发生的变化状况, 同时对鱼体中的重金属含量进行了质量评价, 为保护我国东南沿海地区的环境与食品安全评估提供科学依据。主要研究结果如下:

1 我国主要红树林区鱼类重金属含量的分布特征为: $Zn > Cr > Cu > As > Hg > Pb > Cd > MeHg$ 。多鳞鱚 (*Sillago sihama*)、黄斑篮子鱼 (*Siganus oramin*)、鲷鱼 (*Therapon theraps*) 各重金属含量具有较一致的地区分布特征, 多鳞鱚基本表现为: 浮宫 > 大冠沙 > 东寨港; 黄斑篮子鱼、鲷鱼基本表现为: 大冠沙 > 东寨港。斑瞳鲷 (*Inegocia guttata*) 中重金属含量在三个地区的分布没有规律性。除了受自身生理代谢的影响外, 鱼体内重金属的含量还受到所处生境的重要影响。

2 各地区鱼类重金属含量随鱼类栖息水层的分布变化不规则, 但在食性方面, Cu 含量的大小为: 植食性 > 杂食性 > 肉食性, 表明具有生物稀释作用; As、Hg 含量的大小为: 肉食性 > 杂食性 > 植食性, 表明具有生物放大作用。通过分析鱼类重金属含量之间及其与体长、体重的相关性, 发现: 东寨港鱼类的 As—Hg, 大冠沙鱼类的 Cu—Pb, 浮宫鱼类的 Cr—As 之间均表现出显著的正相关性; 东寨港鱼类的 Pb 含量与体长、大冠沙鱼类的 Zn 含量与体重、浮宫鱼类的 Cr 含量与体长存在显著负相关性。

3 在浮宫地区, Cr、Pb、Hg 含量的大小顺序均为: 鸟类 > 鱼类 > 虾类; MeHg 含量的大小顺序为: 鱼类 > 鸟类 > 虾类; Cu 含量的大小顺序为: 鸟类 > 虾类 > 鱼类; Zn 含量的大小顺序为: 虾类 > 鸟类 > 鱼类; As 含量的大小顺序为: 虾类 > 鱼类 > 鸟类; Cd 含量的大小顺序为: 鱼类 > 虾类 > 鸟类。多鳞鱚等 5 种鱼重金属含量的季节分布特征可分为 3 种类型, Cu、Zn、As、Hg、Cd 为: 冬季 > 夏季, Cr 为: 夏季 > 冬季, Pb、MeHg 的变化不具有一致的特征。

4 采用国家标准、应用生物质量指数法对所研究鱼类进行质量评价, 发现:

各地区鱼类 Cu、Zn、Cd、Pb、MeHg 的质量指数都小于 1，但个别鱼类 Cr、As、Hg 的质量指数大于 1，说明受到了相应重金属元素的污染。

5 比较三个地区鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ ，发现浮宫样区鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 变化幅度最小，说明该地区所研究鱼类具有相似的食物来源；而大冠沙鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 变化幅度最小，说明所研究鱼类在食物链中所占据的营养位置相似。而相关性分析表明：三个地区鱼类 Cu 含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著的负相关，表明具有生物稀释作用；而 Hg 与 $\delta^{15}\text{N}$ 存在正相关，表明具有生物放大作用；As 含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 也存在正相关。这与根据鱼类食性所得结果相一致。

关键词：重金属；生物放大；稳定同位素；红树林

Abstract

With the rapid development of science technology and society, heavy metal pollution has brought many harms to human beings, which causes extensive concern, and thus the study of heavy metal pollution has become one of the hot researching spots of environmental science and biology. In combination of pollution ecology, the technique of stable isotope was introduced to the study of mangrove ecosystem. Based on the comparison of different methods of digestion, the characteristics of content of eight heavy metals, including Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, As, Hg and MeHg, and their biomagnification in food web (chain), have been studied in bodies of primarily economic shrimps and fishes in three mangrove forests. This will provide scientific basis for the assessment of environment and food safety in southeast costal areas of China. Here are the main results:

1 The content of heavy metals in fishes of main mangrove forests are in the order of $Zn > Cr > Cu > As > Hg > Pb > Cd > MeHg$. There were consistent geographic characterizations of heavy metal content in *Sillago sihama*, *Siganus oramin*, and *Therapon theraps*, with the order of Fugong > Da Guansha > Dong Zhagang of *Sillago sihama*, and Da Guansha > Dong Zhagang of *Siganus oramin* and *Therapon theraps*, respectively. However, the distribution of heavy metal content in *Inegocia guttata* within the three districts did not show any similar regularity. Besides the effects of their own metabolism, heavy metal contents in fishes were also affected by their habitats significantly.

2 The content of heavy metals in fishes of different areas changed irregularly with water layers in which they inhabit. But in terms of feeding habits, Cu content were in the order of herbivorous > omnivorous > carnivorous; this indicated the existence of biodilution; whereas, As, Hg content were in the order of carnivorous > omnivorous > herbivorous and this showed biomagnification. Correlation regression analysis showed that there were significantly positive relationships between As and Hg in Dong Zhaigang, Cu and Pb in Da Guansha, Cr and As in Fugong; and that there were significantly negative relationships between Pb and length in Dong Zhaizhang, Zn and weight in Da Guangsha, Cr and length in Fugong.

3 In Fugong, Cr, Pb, Hg contents were all in the order of birds > fishes > shrimps; MeHg was in the order of fishes > birds > shrimps; Cu content was in the order of

birds > shrimps > fishes; Zn content was in the order of shrimps > birds > fishes; As content was in the order of shrimps > fishes > birds; Cd content was in the order of fishes > shrimps > birds. And there were three patterns of the heavy metal distributions in *Sillago sihama* and the other four types of fish, which are in the order of winter > summer with Cu, Zn, As, Hg, Cd, summer > winter with Cr, and irregular changes with Pb, MeHg.

4 Fishes' quality was evaluated by using of national standards coupled with bio-mass index method and results showed that: the quality indexes of Cu, Zn, Cd, Pb, MeHg were below 1, but Cr, As, Hg of some fish were above 1, this indicated the corresponding pollution, thus some agents ought to attach importance to this issue.

5 $\delta^{13}\text{C}$ of fish from Fugong had the smallest change extent, which showed that fish studied from this region had the similar food sources; $\delta^{15}\text{N}$ of fish from Da Guansha had the smallest change extent, which showed that fish studied from this region had the similar trophic position in food chains. Correlation analysis showed that there were significantly negative correlation between Cu and $\delta^{15}\text{N}$ in the three regions and thus there existed biodilution; however there were much significantly positive correlation between Hg and $\delta^{15}\text{N}$ and this showed the effect of biomagnification; there was also positive relationship between As and $\delta^{15}\text{N}$. These results were in accord with that from feeding habitat analysis.

Key Words: Heavy Metal; Biomagnification; Stable isotope; Mangrove

第一章 前言

1 重金属的危害

随着科技的飞速进步和社会的迅猛发展,人类活动对环境的影响越来越大。工业三废的排放、农业杀虫剂的使用、生活废弃物的堆放等,对环境造成了严重的危害。各种重金属离子、有机污染物、无机污染物和放射性物质通过地表径流、大气沉降等途径进入水体,给水产品质量带来诸多不安全因素。其中重金属污染是影响水产品质量的主要因素之一。重金属污染主要是指通过各种途径进入到环境中的 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Hg、As 等重金属及其化合物对环境造成的危害。由于残毒时间长,具有积累性,有毒的重金属物质在水生生态系统中能够沿食物链经富集作用而蓄积,达到一定浓度后,使本来为人们提供丰富蛋白质的鱼、虾、蟹、贝类等反而可能成为毒物的浓缩体,进而危及人类的健康。震惊世界的环境公害之一——“水俣病”就是一个典型的例子。日本熊本县水俣湾的鱼、虾、贝类等水生生物被周围石油化工厂排放的含汞废水污染,当地居民长期食用这种富集了甲基汞的鱼,导致中枢神经中毒、甚至死亡。这就是典型的由含汞废水进入“海水——鱼——人”食物链而造成的对人体的严重毒害。除此之外,“痛痛病”是另一例影响面广泛、受害人数众多的由重金属污染引起的环境公害病。“痛痛病”实际就是典型的慢性镉中毒,它是由镉对人类生活环境的污染而引起的,人们长期吃被镉污染的大米,喝被镉污染的水,久而久之,就造成了慢性镉中毒。As 具有致癌、致畸和致突变的作用(张笑一等, 1997)。因而伴随着人们认识的提高,近十几年来,重金属对水生生物的污染越来越受到国内外研究者的高度重视,成为环境科学、地球化学与生物科学的热点研究课题。

张秀云等(1998)研究了天津污水养鱼池中五种重金属元素(Hg、Cd、Pb、Cr、Cu)在鲤鱼、鲢鱼肉中的积累情况,并以水库中同种鱼作为对照。结果表明各种元素在鱼肉中的积累倍数变化很大,从 10 倍至 136 倍。而刘长发等(1999)的研究表明,天津污水鱼塘养殖鱼的可食部分肌肉中,铅含量的测定值均超标,最低含量超标 7.2 倍,最高检出值则超标 62 倍。杨丽华等(2002)测定了广州市场食用鱼类和双壳贝类的 Cd、Pb、Cr、Ni、Cu 和 Zn 等重金属的含量并作出评价,发现贝类的 Cd 含量已超过“人体卫生消费标准”,其中牡蛎的 Cu 和 Zn 含量则略超过“人体卫生消费标准”,其食用价值受到严重威胁,应引起重视。

James van den Broek 等 (2002) 研究发现澳大利亚泻湖食蚊鱼中锌的含量是食品标准上限的两倍。祝云龙等 (2007) 研究了大通湖及东洞庭湖区生物体重金属的水平, 发现鱼对 Hg 的富集系数高达 57520, 螺肉中 As 富集系数为 81.92, 虾对重金属 Cd 和 Pb 的富集系数分别为 19064 和 2441.6, 其中鹿角和岳阳港采集的虾中 Cd 含量分别超过了无公害水产品的限量要求 ($500\mu\text{g/kg}$) 的 1.07 倍和 0.43 倍, 表明受到了重金属 Cd 的污染, 而 Pb 的含量分别超过了无公害水产品的限量要求 ($500\mu\text{g/kg}$) 的 1.3 倍和 0.4 倍, 表明重金属 Pb 的污染较严重。

但是, 由于水生食物网错综复杂, 构建十分困难, 因此有关重金属沿食物链生物放大作用的研究报道不多, 目前的研究主要集中在重金属对某一种或某一类生物的污染或是在动物体内的分布特征。有人用室内饲养法评估污染物沿食物链的生物放大作用 (Suedel et al., 1994), 也就是用特定的食物饲养已知在水生食物链上处于一定营养位置的生物, 然后测定这些生物组织中的污染物含量水平。但这是在对动物的食物进行严格控制的条件下进行的, 而野外的情况通常是多种食物并存, 动物可以有更多的选择; 并且这种方法往往只考虑一种或少数几种元素的作用, 而忽略了多种元素之间可能存在的加和作用、协同作用及拮抗作用。由此可见, 室内的饲养实验不能准确反映野外的真实情况, 需要新的研究手段。

稳定同位素法是根据同位素因质量的微小差异而具有分馏效应的特性, 用质谱仪测定样品中同位素比值从而解释相关问题的方法。在过去的几十年里, 伴随着稳定同位素理论的日益完善和质谱测试技术的不断改进, 稳定同位素技术的应用范围越来越广泛。在植物生理生态学方面, 稳定同位素用于研究植物的光合作用途径、水分来源和利用效率等; 在生态学方面, 稳定同位素用于研究生态系统的碳源、构建食物网、跟踪动物的迁徙等; 在环境科学方面, 稳定同位素用于追踪有机质和污染物的来源等。总之, 稳定同位素方法已经成为环境科学、生态学、地球化学等学科领域最有效的研究手段之一, 使现代生态学家能够解决用其他方法难以解决的问题 (Ehleringer, 1993; Yakir and Sternberg, 2000; Dawson, 2002)。

2 稳定同位素方法的优越性和可行性

研究动物食性的传统方法是胃含物分析法 (Stomach content analysis), 也就是通过对动物胃、肠的解剖, 观察残留的食物组成, 从而确定生物的食性。这种方法的优点是直观, 缺点是偶然性大, 由于测量的只是动物被捕获前所摄食物, 是对动物食性的“快照” (snapshot), 需要作大量的统计分析才能缩小误差。此

外,这种方法也不能区分食物的消化难易程度,观察到的大多是不易被动物消化的食物。因此,用这种方法分析、建立食物网需要的时间长,工作强度大,不利于长期、经常地监测海洋生态系统的动态变化。

相对于分析胃肠内含物来确定动物食性、构建食物网的传统方法来说,稳定同位素分析法(Stable isotope analysis)具有下列特点:

- 1 稳定同位素的分析材料是构成动物身体的组织,甚至是整个动物,因此它反映的是动物对其食物长期摄取、消化、吸收、同化的综合结果(Bootsma et al., 1996)。而胃肠内含物分析法尽管直观明了,但它观察到的只是动物在被捕获前的短期取食情况。此外,动物对各种食物的实际消化吸收能力也不尽相同,所以仅根据数量的多少来推断各种食物对消费者的贡献未免有失偏颇。
- 2 胃肠物分析法具有较大的偶然性。首先是动物在捕食前的取食具有偶然性,其次试验人员对动物的捕获也具有一定的偶然性。为了减小这种偶然性,就要进行大量的统计学工作,耗时耗力,同时也会给当地的生态平衡带来一定的负面影响。由于同位素分析法反映的是动物对其食物长期摄取、消化、吸收、同化的综合结果,就可避免这种偶然性,减少了大量的统计工作。
- 3 有些动物太小,或者是珍稀保护动物,或者是已经灭绝的动物,胃肠物分析法不适用。

基于以上原因,稳定同位素方法在植物生理学、生态学和环境科学中得到了广泛的应用(王建柱等, 2004),并且越来越多的应用于水生生态系统的研究中(Gu et al., 1996; Vander Zanden et al., 1996; Overman and Parrish, 2001; Renones et al., 2002)。Whitledge 等(1997)分别用传统的食性分析方法和稳定性同位素方法对美国密苏里州的两种淡水螯虾作了测量和比较,发现经过消化吸收效率的校正后,用传统的食性分析方法所得到的结果与用稳定性同位素所得结果相当一致,表明了稳定性同位素方法在分析动物食物和能量来源过程中的优越性和可行性。蔡德陵等(2005)采用稳定性碳、氮同位素方法研究了黄东海生态系统食物网的营养结构,初步建立了从浮游植物到顶级捕食者的水体食物网连续营养谱,并结合底栖生物碳同位素资料勾勒出黄东海食物网营养结构图,与根据 1985—1986 年根据主要资源种群生物量绘制的黄海简化食物网和营养结构图基本一致并略有改进。结果证明,稳定同位素方法是未来研究从病毒到顶级捕食者完整海洋食物网连续营养谱以及食物网稳定性的一个潜在的有用手段。

3 稳定同位素方法在生态学中的应用

1953 年, Craig 最早发现生活于同一环境中的动物和植物具有相似的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。之后, 野外和室内的研究也都证实了这一现象: 在从植物到初级消费者再到次级消费者的过程中, $\delta^{13}\text{C}$ 值只发生极微小的改变。正是由于只发生极微小的变化, 动物组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常可以反映它们所同化的食物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。至少在同位素方面, 那句古老的谚语——你就是你所吃的再加上或减去千分之几 (You are what you eat), 是正确的。这就是利用稳定同位素研究海洋、陆地和淡水环境中动物碳源的理论基础 (DeNiro and Epstein, 1978; Rounick and Winterbourn, 1986; Peterson and Fry, 1987; Fry, 1988; France and Peters, 1997)。

与碳不同, 消费者的稳定性氮同位素组成通常比其食物高 3–5‰ (DeNiro and Epstein, 1981; Minagawa and Wada, 1984; Peterson and Fry, 1987; Hobson and Welch, 1992), 因此 $\delta^{15}\text{N}$ 可用来确定生物的营养级, 构建食物网。目前稳定性碳、氮同位素在生态系统中的应用主要集中在以下几个方面。

3.1 研究生态系统中的碳源和生物的食性

Herwig 等 (2004) 用碳、氮同位素测定了密西西比河和伊利诺斯河静水区的食物网结构, 发现并不是大型水生植物, 可能是浮游植物和源自一些 C_3 植物的碎屑是该系统的主要直接碳源。古生态学家和人类学家通过测定骨胶原中的稳定性碳同位素比值并联合使用放射性 ^{14}C 测定年代, 从而精确估算了人类是在何时从狩猎采集生活方式 (以 C_3 植物为基础) 过渡到了定居生活方式 (以 C_4 植物为基础) 并且开始种植玉米的 (Van Der Merwe, 1982)。

蔡德陵等 (2001) 通过分析 1993 年 8 月和 1994 年 2 月、5 月在崂山湾潮间带采集的底栖生物碳稳定同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$ 值), 发现这一地区底栖动物的主要食物来源有 4 类: 水体中的颗粒有机质 (POM)、底栖硅藻、大型底栖藻类和底泥中的有机物质 (SOM)。其中, 双壳类等滤食性动物的食物来源主要是 POM; 甲壳动物的食物来源多样; 底栖硅藻是多数腹足类食物来源的相当重要组成部分。郭卫东等 (2002) 利用稳定碳同位素分析技术研究了南沙渚碧礁生态系食物网主要生物类群之间的营养关系。

稳定性碳、氮同位素还可以用于判断生物的食性转变。易现峰等 (2003a) 通过测定海北高寒草甸生态系统中大鸕、小型哺乳类以及雀形目鸟类肌肉的稳定性碳同位素组成, 发现在采取大规模的化学灭鼠后, 大鸕的食性发生了巨大的改

变，其食物主要来源由原来的小型哺乳类转变为雀形目鸟类。

由于 RuBP 羧化酶和 PEP 羧化酶对 ^{13}C 具有不同的排斥效应，导致不同光合型植物 (C_3 、 C_4 和 CAM 植物) 的稳定性碳同位素组成差异很大 (Bender, 1971; Bender et al., 1972; Smith and Epstein, 1971; O'Leary, 1981; Rounick and Winterbourn, 1986; Peterson and Fry, 1987; O'Leary et al., 1992)。根据如下质量平衡方程 (Phillips, 2001, 2002)，就可以计算出不同光合型植物对动物食物贡献的比例。

$$\delta^{13}\text{Ccon} = a\delta^{13}\text{CproA} + b\delta^{13}\text{CproB}$$

$$1 = a + b$$

式中 a、b 分别为食物 A、B 对消费者的贡献比例， $\delta^{13}\text{CproA}$ 和 $\delta^{13}\text{CproB}$ 分别为食物 A 和 B 的碳同位素比值， $\delta^{13}\text{Ccon}$ 为消费者的碳同位素比值。

Boutton 等 (1983) 研究了东非草原上白蚁 (*Macrotermes michaelseni*) 的食物组成，发现 C_4 植物在两种白蚁的食物中所占比例分别为 70% 和 64%；Magnusson 等 (1999) 研究了 C_3 、 C_4 植物对亚马逊热带稀树大草原上多种动物的食物贡献比例，发现蝗虫 (*Tropidacris collaris*) 的食物中 C_3 植物约占 90%，2 种切叶蚁 (*Acromyrmex laticeps nigrosetosus* 和 *Atta laevigata*) 的食物中 C_3 植物约占 70%；2 种白蚁 (*Syntermes molestus* 和 *Nasutitermes sp.*) 则主要以 C_4 植物为食，而以白蚁为食的青蛙和蜥蜴有超过 50% 的食物源于 C_4 植物；杂食性啮齿动物 (*Bolomys lasiurus*) 大约有 60% 食物来自 C_3 植物。

当动物的食物来源多于 2 种，为 3 种或 3 种以上时，可以通过同时建立几种同位素 (如 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 等) 的质量平衡方程对多种食物的贡献比例进行定量 (n 种同位素定量 n+1 种食物) (Phillips, 2001, 2002)。如下式：

$$\delta^{13}\text{Ccon} = a\delta^{13}\text{CproA} + b\delta^{13}\text{CproB} + c\delta^{13}\text{CproC}$$

$$\delta^{15}\text{Ncon} = a\delta^{15}\text{NproA} + b\delta^{15}\text{NproB} + c\delta^{15}\text{NproC}$$

$$1 = a + b + c$$

式中 a、b、c 分别为食物 A、B、C 对消费者的贡献比例， $\delta^{13}\text{CproA}$ 、 $\delta^{13}\text{CproB}$ 和 $\delta^{13}\text{CproC}$ 分别为食物 A、B、C 的碳同位素比值， $\delta^{15}\text{NproA}$ 、 $\delta^{15}\text{NproB}$ 和 $\delta^{15}\text{NproC}$ 分别为食物 A、B、C 的氮同位素比值， $\delta^{13}\text{Ccon}$ 、 $\delta^{15}\text{Ncon}$ 为消费者的碳、氮同位素比值。

Harrigan 等 (1989) 用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 对红树林区和海草区的灰笛鲷 (*Lutjanus*

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库